

УДК 621.317

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ ЗА СЧЕТ КОРРЕКЦИИ МГНОВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ ГАРМОНИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ*

В.С. Мелентьев

Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

E-mail: vs_mel@mail.ru

Рассматривается новый метод измерения частоты гармонических сигналов, основанный на формировании дополнительного сигнала напряжения и выявлении моментов переходов сигналов через ноль. Предлагается структурная схема средства измерения, реализующего метод. Реализация метода обеспечивает исключение погрешности, которая обусловлена неидеальностью фазосдвигающих блоков, осуществляющих формирование дополнительных сигналов за счет коррекции мгновенных значений дополнительного сигнала. Приводятся результаты анализа погрешности метода, обусловленной отклонением реального сигнала от гармонической модели. Полученные результаты позволяют выбирать соответствующие аппаратные средства и параметры измерительного процесса в зависимости от предъявляемых требований по точности и времени измерения и заданного диапазона частот.

Ключевые слова: гармонические сигналы, частота, мгновенные значения, дополнительные сигналы, фазосдвигающие блоки, погрешность, коррекция.

Для решения задач испытаний и контроля энергообъектов и электротехнического оборудования, автоматизированного управления технологическими процессами требуется создание методов и средств измерения параметров периодических сигналов, включая частоту. Кроме того, очень часто некоторые физические величины с помощью датчиков предварительно преобразуются в сигналы, информативным параметром которых является частота [1].

Современные методы и средства измерения (СИ) частоты низкочастотного диапазона основаны в основном на ее преобразовании в интервалы времени, длительность которых затем определяют цифровыми методами. Среди цифровых методов измерения длительности временных интервалов наиболее распространенным является метод последовательного счета. Кроме того, часто используются модификации данного метода (метод задержанных совпадений, нониусный метод), обеспечивающие повышение точности измерения [2]. При использовании данных методов время измерения не может быть менее периода входного сигнала. В связи с этим задача создания методов и СИ частоты, обеспечивающих высокое быстродействие и точность, является актуальной. Особенно остро стоит проблема сокращения времени измерения частоты при контроле параметров датчиков с низкочастотным выходным сигналом, осуществляющих контроль перемещения, а также при определении скорости изменения частоты.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 13-08-00173).

Владимир Сергеевич Мелентьев (д.т.н., проф.), заведующий кафедрой «Информационно-измерительная техника».

В [3] было предложено для сокращения времени измерения частоты сигналов, форма которых близка к гармонической, использовать аппроксимационный подход, основанный на привлечении априорной информации о модели измерительного сигнала для определения его параметров. В качестве модели периодического сигнала обычно выбирают гармоническую с последующей оценкой погрешности, обусловленной несоответствием принятой модели виду реального сигнала.

Дальнейшее сокращение времени измерения обеспечивают методы, основанные на формировании дополнительных сигналов, сдвинутых относительно входных по фазе [4], и определении частоты по мгновенным значениям входного и дополнительных сигналов.

Однако реализация данных методов может привести к погрешности по напряжению (погрешности по модулю) фазосдвигающих блоков (ФСБ), осуществляющих формирование дополнительных сигналов. Амплитуда входного сигнала может отличаться от амплитудного значения сигнала на выходе ФСБ [5].

В статье рассматривается новый метод измерения частоты гармонического сигнала, реализация которого обеспечивает исключение погрешности по модулю ФСБ за счет коррекции мгновенных значений дополнительного сигнала.

Метод заключается в формировании двух дополнительных сигналов напряжения, сдвинутых по фазе на углы $\Delta\alpha$ и $2\Delta\alpha$ относительно входного. Причем в момент перехода через ноль дополнительного напряжения, сдвинутого относительно входного на $2\Delta\alpha$, измеряют первые мгновенные значения входного и дополнительного сигнала, сдвинутого относительно входного на угол $\Delta\alpha$. В момент перехода через ноль дополнительного напряжения, сдвинутого относительно входного на $\Delta\alpha$, измеряют второе мгновенное значение входного напряжения. Через образцовый интервал времени Δt с момента первого перехода через ноль одновременно измеряют мгновенные значения входного и дополнительного сигнала, сдвинутого относительно входного на $\Delta\alpha$. Частоту определяют по измеренным мгновенным значениям напряжения с учетом вычисленного корректирующего коэффициента, определяющего соотношение между амплитудными значениями входного и дополнительного сигналов.

Временные диаграммы, поясняющие метод, представлены на рис. 1.

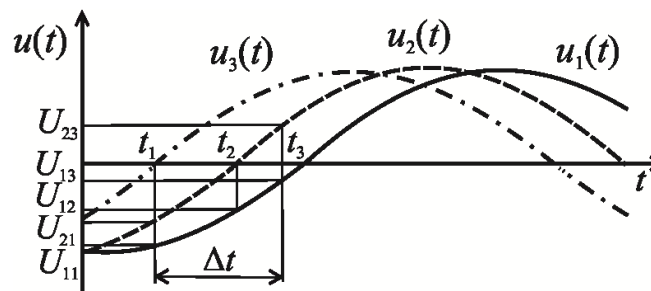


Рис. 1. Временные диаграммы, поясняющие метод

Для входного гармонического напряжения $u_1(t) = U_{m1} \sin \omega t$ дополнительные сигналы примут вид $u_2(t) = U_{m2} \sin(\omega t + \Delta\alpha)$, $u_3(t) = U_{m3} \sin(\omega t + 2\Delta\alpha)$, где U_{m1} , U_{m2} , U_{m3} – амплитудные значения входного, первого и второго дополнительных напряжений соответственно; ω – угловая частота.

В момент времени t_1 , когда сигнал $u_3(t)$ переходит через ноль, мгновенные значения входного и дополнительного напряжения $u_2(t)$ будут равны

$$U_{11} = U_{m1} \sin(-2\Delta\alpha); U_{21} = U_{m1} \sin(-\Delta\alpha).$$

В момент времени t_2 , когда сигнал $u_2(t)$ переходит через ноль, мгновенное значение входного сигнала примет вид $U_{12} = U_{m1} \sin(-\Delta\alpha)$.

Через образцовый интервал времени Δt с момента перехода через ноль напряжения $u_3(t)$ (момент времени t_3) мгновенные значения входного и дополнительного сигнала $u_2(t)$ будут равны

$$U_{13} = U_{m1} \sin(\omega\Delta t - 2\Delta\alpha); U_{23} = U_{m2} \sin(\omega\Delta t - \Delta\alpha).$$

Погрешность по напряжению ФСБ может быть оценена коэффициентом

$$k_m = \frac{U_{m2}}{U_{m1}} = \left| \frac{U_{21}}{U_{11}} \right|.$$

С помощью данного коэффициента можно скорректировать мгновенное значение дополнительного напряжения:

$$U'_{23} = \frac{U_{23}}{k_m} = U_{m1} \sin(\omega\Delta t - \Delta\alpha).$$

Используя мгновенные значения, можно определить частоту сигнала:

$$f = \frac{1}{2\pi\Delta t} \arcsin \frac{|U'_{23}U_{11} - U_{12}U_{13}| \sqrt{4U_{12}^2 - U_{11}^2}}{2U_{12}^3}. \quad (1)$$

Анализ показывает, что частота сигнала не зависит от величины угла сдвига фазы $\Delta\alpha$.

Схема средства измерения, реализующего метод, приведена на рис. 2.

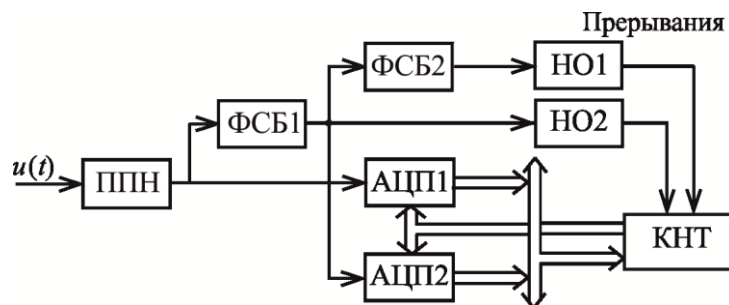


Рис. 2. Схема СИ, реализующего метод

СИ содержит: первичный преобразователь напряжения ППН, два фазосдвигающих блока ФСБ1 и ФСБ2, осуществляющих сдвиг сигналов на угол $\Delta\alpha$, аналого-цифровые преобразователи АЦП1 и АЦП2, два нуля-органа НО1 и НО2 и контроллер КНТ.

Частота сигнала определяется согласно выражению (1) методически точно только для гармонических сигналов.

Проведем анализ погрешности из-за отклонения реального сигнала от гармонической модели, используя методику, предложенную в [6]. Методика заключается в оценке погрешности результата измерения частоты как функции, аргу-

менты которой заданы приближенно с погрешностью, соответствующей отклонению модели от реального сигнала.

Если в качестве аргументов использовать наибольшие отклонения реального сигнала от гармонической модели, предельная абсолютная погрешность определения частоты сигнала примет вид

$$\Delta f = \left[\left| \frac{\partial f}{\partial U_{11}} \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial U_{12}} \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial U_{13}} \right| + \left| \frac{\partial f}{\partial U'_{23}} \right| \right] \Delta U_{\max}, \quad (2)$$

где $\Delta U_{\max} = U_{m1} \sum_{k=2}^{\infty} h_k$ – максимальное отклонение сигнала от гармонической модели; U_{m1} – амплитудное значение первой гармоники напряжения; U_{mk} – амплитудное значение k -й гармоники напряжения; $h_k = \frac{U_{mk}}{U_{m1}}$ – коэффициент k -ой гармоники напряжения.

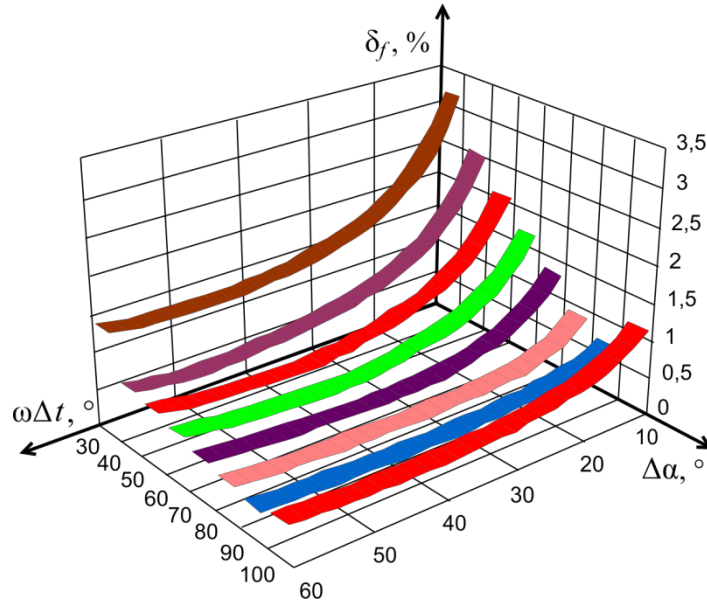


Рис. 3. Графики зависимости погрешности измерения частоты от $\omega\Delta t$ и $\Delta\alpha$

В соответствии с (1) и (2) относительная погрешность определения частоты сигнала будет равна

$$\delta_f = \frac{\sum_{k=2}^{\infty} h_k}{2\omega\Delta t |\cos\omega\Delta t \sin^3 \Delta\alpha|} \left\{ |\sin\omega\Delta t| |2\sin\Delta\alpha \sin(\omega\Delta t - 2\Delta\alpha) - \cos\Delta\alpha| + 2|\sin^3 \Delta\alpha| \times \right. \\ \left. \times (2|\cos\Delta\alpha| + 1) + 2|\sin^2 \Delta\alpha| [\sin(\omega\Delta t - 2\Delta\alpha) + 3\sin\omega\Delta t] - \sin\omega\Delta t \right\}. \quad (3)$$

Анализ выражения (3) показывает, что погрешность определения частоты зависит от гармонического состава сигнала, величины образцового интервала времени Δt и угла сдвига фазы ФСБ $\Delta\alpha$.

На рис. 3 представлен график зависимости погрешности определения частоты от $\omega\Delta t$ и $\Delta\alpha$ при наличии в сигнале первой и третьей гармоники с $h_3 = 0,1\%$.

Анализ рис. 3 показывает, что погрешность определения частоты существенно зависит от угла сдвига фазы ФСБ. Меньшие значения погрешности имеют место при $\Delta\alpha = 90^\circ$. Кроме того, погрешность зависит от соотношения длительности образцового интервала времени Δt и периода входного сигнала. При этом минимальные значения погрешности имеют место при $30^\circ < \omega\Delta t < 60^\circ$.

Полученные результаты позволяют выбирать соответствующие аппаратные средства и параметры измерительного процесса в зависимости от предъявляемых требований по точности и времени измерения и заданного диапазона частот.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Преобразователи электрических параметров для систем контроля и измерения / А.И. Мартышин, Э.К. Шахов, В.М. Шлядин. – М.: Энергия, 1976. – 392 с.
2. Зайцев С. Цифровые методы время-частотных измерений // Современная электроника. – 2009. – № 6. – С. 20–23.
3. Мелентьев В.С. Измерительно-моделирующий подход к определению частоты сигналов // Современные информационные технологии: Тр. междунар. науч.-техн. конф. – Пенза: ПГТА, 2005. – Вып. 2. – С. 49–51.
4. Мелентьев В.С., Сеницын А.Е., Миронов А.А. Метод измерения частоты по мгновенным значениям входного и дополнительного сигналов // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: Матер. X Междунар. науч.-практ. конф. – Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2013. – С. 187–189.
5. Мелентьев В.С., Иванов Ю.М., Миронов А.А. Исследование метода измерения частоты гармонических сигналов // Ползуновский вестник. – 2013. – № 2. – С. 198–201.
6. Мелентьев В.С., Батищев В.И. Аппроксимационные методы и системы измерения и контроля параметров периодических сигналов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2011. – 240 с.

Статья поступила в редакцию 26 января 2015 г.

IMPROVING AN ACCURACY OF FREQUENCY MEASUREMENT BY CORRECTING THE INSTANTANEOUS VALUES OF HARMONIC SIGNALS

V.S. Melent'ev

Samara State Technical University
244, Molodogvardeyskaya st., Samara, 443100, Russian Federation

The paper shows a new method of measuring the frequency of harmonic signals based on the formation of additional voltage signal and identification of zero transition moments. The block diagram of measurement tool for implementation of the method is provided. Implementation of the method provides exclusion of the error caused by the non-ideal structure of phase-shifting units which form the additional signals by correcting the instantaneous values of the additional signal. The paper gives the results of analysis of the method error caused by the deviation of the actual signal from the harmonic model. The results allow to choose the appropriate hardware and measurement process parameters depending on the requirements of accuracy and measurement time and the specified frequency range.

Keywords: harmonic signals, frequency of signals, instant values, additional signals, phase-shifting units, an error, correction.

Vladimir S. Melent'ev (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.